

<http://dx.doi.org/10.15202/25254146.2017v2n3p67>

ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO X ESTRUTURA EM PROJETO DE FUNDAÇÃO DIRETA

Patrícia Barreto de Lima

Engenheira Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
patricia.bali92@gmail.com

Juliano de Lima

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
jde_lima@hotmail.com

José Artur d'Oliveira Mussi

Mestre pelo PPTEC - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
arturmussi@gmail.com

Rosana Dischinger Miranda

Mestre pelo PPTEC - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
Professora do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
rosanadmiranda@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo da interação solo-estrutura (ISE) de fundação circular de determinada edificação convencional. Nesta análise foi utilizado o programa SAP 2000 para a modelagem tridimensional da estrutura obtendo-se as reações nos apoios a serem estudados. Também foi utilizado o programa Plaxis2D para uma análise bidimensional dos solos e fundações a partir de uma sondagem dada. Após a obtenção dos diâmetros das sapatas e dos parâmetros do solo, foi realizado estudo dos recalques de acordo com o número de pavimentos do edifício e depois foram encontrados os coeficientes de reação vertical. A estrutura foi novamente calculada considerando a hipótese de Winkler, onde as bases estão apoiadas sobre molas e, a partir dos resultados, foram realizadas comparações do edifício com e sem a ISE. Também foram feitas comparações entre os resultados dos deslocamentos encontrados no Plaxis e no SAP2000.

Palavras-chave: Interação solo x estrutura. Apoio elástico. Modelagem computacional. Fundação direta.

ANALYSIS OF INTERACTION ONLY X STRUCTURE IN SHALLOW FOUNDATION PROJECT

ABSTRACT

This work focuses - the study of soil-structure interaction, considering the effects of soil on a superstructure supported on circular footings. In this analysis we used the SAP 2000 program for three-dimensional modeling of the structure obtained - if the supports reactions to foundations from a given probe. After obtaining the diameter of shoes and soil parameters, a study was

made of repression according to the number of floors of the building and then, the vertical reaction rates were found. The structure was again calculated using the assumption Winkler, which bases are supported on springs and from the results building comparisons were made with and without the ISE. Also comparisons were made between the results of displacement found in Plaxis and SAP2000.

Keywords: Soil structure interaction. Elastic support. Computacional modeling. Shallow foundation.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo analisar os efeitos da interação solo-estrutura em um edifício, considerando o número de pavimentos, os parâmetros do solo, e os recalques originados na estrutura.

Com o avanço da tecnologia muitos programas buscam aproximar os modelos de cálculo de um projeto estrutural da realidade. Antigamente, para considerar uma estrutura com base deslocável era preciso diversos cálculos e considerações que tornavam os projetos trabalhosos e complexos, sejam pelas inúmeras equações que tomavam muito tempo ou pelo déficit de literaturas sobre o assunto da interação solo - estrutura.

Normalmente, para o estudo de um projeto estrutural e de fundações, considerando que a análise dos esforços e dos recalques são feitas de maneiras independentes, os escritórios de cálculo supõem uma estrutura de apoios indelocáveis, sendo que os resultados das reações são enviados ao geotécnico responsável que, comparando com recalques admissíveis, elabora o projeto de fundações. Esta hipótese pode afastar da realidade física os resultados.

A consideração da interação solo x estrutura é a maneira mais eficaz de mostrar essa relação entre a superestrutura e o solo. Os elementos estruturais das fundações, em conjunto com o maciço de solo envolvente, representam um sistema único e integrado, e essa interação influencia no cálculo da estrutura.

2 A INTERAÇÃO SOLO X ESTRUTURA

A interação solo x estrutura condiciona a forma como uma estrutura reage às solicitações ao ser submetida a um carregamento externo, apresentando cargas nas fundações em função das condições particulares do solo suporte e do tipo de estrutura (DANZIGER; DANZIGER & CRISPEL, 2005).

Ao serem considerados os efeitos da movimentação do solo na estrutura, pode-se perceber que ações que não seriam apreciadas anteriormente, podem ser consideradas irrelevantes em alguns casos de acordo com as características da edificação, e em outros podem ser de extrema relevância sua consideração.

2.1 Modelo estrutural para análise

Será feito o estudo dos efeitos da interação solo-estrutura de um edifício hipotético modelado no programa SAP2000, onde será feito um estudo tridimensional da estrutura dada,

considerando bases indeslocáveis. Para o cálculo, foi considerado um prédio comercial de concreto armado.

O prédio possui 10 pavimentos e cada um deles com 3,0 metros de altura. Foram considerados como cargas verticais o peso próprio, 200kg/m² de carga accidental e 100 kg/m² de revestimento, segundo a NBR 6120:1980, para os pavimentos tipos (1º ao 10º andar). Na cobertura foi considerado 50 kg/m² de carga accidental, 50 kg/m² devido ao telhado e 100kg/m² de revestimento. Foi considerada uma alvenaria de 15cm de espessura em todas as vigas com carga de 590 kg/m.

Para cargas horizontais foram consideradas as ações do vento na estrutura de acordo com as especificações da NBR 6123:1988. A velocidade básica do vento (V_0) utilizada foi de 35m/s, obtida na isopleta da norma, de acordo com o local, no caso, Rio de Janeiro.

Para o fator topográfico (S_1), que leva em consideração as variações do relevo do terreno, foi adotado 1,0, correspondente a um terreno plano ou fracamente acidentado.

Para o fator rugosidade (S_2) foi adotada a categoria IV, correspondente a terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Em relação a classe, este edifício foi classificado como classe B, onde considera toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical esteja entre 20 metros e 50 metros.

O fator estatístico (S_3) adotado foi igual a 1,0, devido a classificação do edifício como pertencente ao grupo 2 da tabela da NBR 6123:1988.

V_k corresponde a velocidade característica do vento do local estudado, sendo encontrado pela equação $V_k = V_0 S_1 S_2 S_3$.

Ainda de acordo com a NBR 6123:1988 substituindo o valor de V_k na equação $q=0,613 \cdot V_k^2$ pode-se encontrar a pressão dinâmica variando de acordo com a altura de atuação no edifício.

Como este edifício é fracamente variável, torna-se aplicável, a consideração do coeficiente de arrasto para encontrar a força de arrasto do vento perpendicular a cada uma das fachadas da edificação através da equação $F_a = C_a \cdot q \cdot A_e$, onde com a utilização da equação encontra-se os valores apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Atuação do vento a 90° e 180°

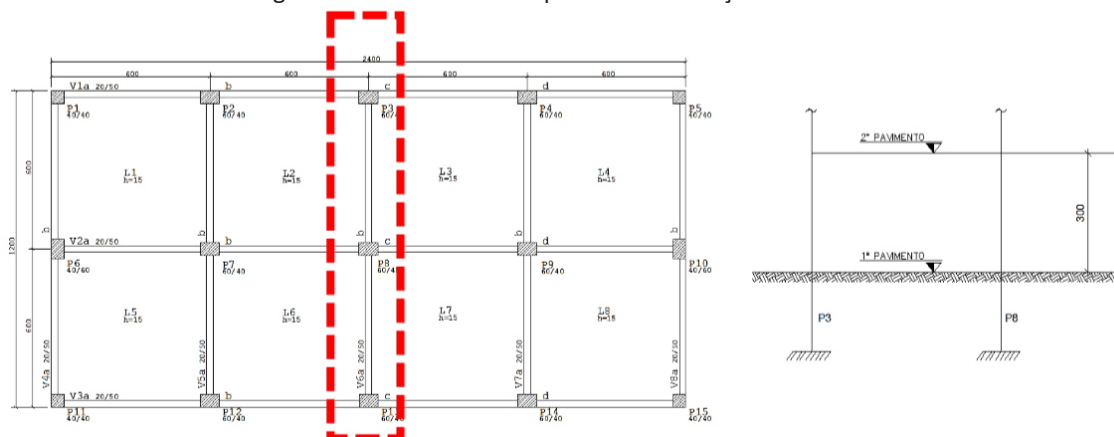
	h (m)	C_a (90°)	C_a (180°)	q (kN/m ²)	Vento a 90°(kN/m ²)	Vento a 180°(kN/m ²)
F_{a_1}	$h \leq 5$	0,9	1,3	0,43	0,39	0,56
F_{a_2}	$5 \leq h \leq 10$	0,9	1,3	0,52	0,47	0,68
F_{a_3}	$10 \leq h \leq 15$	0,9	1,3	0,58	0,52	0,75
F_{a_4}	$15 \leq h \leq 20$	0,9	1,3	0,62	0,56	0,81
F_{a_5}	$20 \leq h \leq 30$	0,9	1,3	0,69	0,62	1,90

FONTE: (Autor, 2016)

2.2 Análise do edifício com apoios indeslocáveis no sap2000

Para a análise inicial do comportamento tridimensional da estrutura, foi considerada a seguinte hipótese: O prédio apoiado em bases indeslocáveis, considerando os apoios engastados, sem a interação solo-estrutura. Será feito o estudo do pórtico assinalado na Figura 1.

Figura 1 - Pórtico utilizado para estudo e seção transversal



FONTE: (Autor, 2016)

Foi feita a modelagem do edifício em 3D no SAP2000, considerando todas as cargas atuantes e as combinações consideradas para o dimensionamento da estrutura. No programa foram definidas as propriedades do material do edifício, as seções dos pilares e as seções das vigas após isso foi feita a determinação dos carregamentos no edifício (alvenarias, cargas acidentais, revestimento, cargas permanentes, telhado e peso próprio)

Dentre as combinações consideradas conforme a NBR 6118:2014, as combinações 2 e 8 estão relacionadas ao Estado Limite Último da estrutura, para fins de análise da estabilidade global e dimensionamento dos elementos estruturais (vigas, sapatas e pilares). A combinação 12 foi gerada para a verificação das tensões e comportamento do solo.

2.2.1 Determinação da capacidade de carga e dimensionamento das sapatas

A partir das combinações, foram calculadas as sapatas com geometria circular para os pilares do pórtico assinalado anteriormente. Para a determinação da capacidade de carga do solo foi utilizado primeiramente o método simplificado (semi-empírico) que relaciona a capacidade de carga com o N_{spt} do solo onde será assentada a sapata a 2 metros de profundidade.

Tendo assim o seguinte valor para tensão admissível:

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{50} = \frac{16}{50} = 320 \text{ kpa}$$

As forças encontradas nas combinações 2 e 8 são descritas na tabela 2.

Tabela 2 - Reações verticais dos pilares do pórtico (Combinações 2 e 8)

COMBINAÇÃO 2			
	P3	P8	P13
Fz(kN)	3084,80	4739,22	3084,80

COMBINAÇÃO 8			
	P3	P8	P13
Fz(kN)	3188,13	4453,27	3188,13

FONTE: Autor (2016)

Os valores iniciais para diâmetro das sapatas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Diâmetros iniciais das sapatas (combinações 2 e 8)

COMB 2	P3	P8	P13
Diâmetro	3,50m	4,34m	3,50m

COMB 8	P3	P8	P13
Diâmetro	3,56m	4,21m	3,56m

FONTE: Autor (2016)

Com esses diâmetros iniciais foi feito o cálculo da capacidade de carga proposta por Terzaghi (1943), considerando uma ruptura generalizada que pode ser calculada pela seguinte expressão (Bowles, 1988):

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{FS} = c \cdot N_c \cdot S_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma + q \cdot N_q \cdot S_q$$

Para encontrar os fatores de forma e os fatores de capacidade de carga, foram utilizadas as tabelas desenvolvidas por DE BEER (1967 apud Vésic, 1975), o ângulo de atrito adotado foi de 33° e o peso específico do solo é de 19 KN/m substitui-se os valores na fórmula de Terzaghi e com os novos valores de tensões admissíveis volta-se novamente a calcular o diâmetro das sapatas que possui agora novos valores, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Diâmetros finais das sapatas

Diâmetros finais da sapata		
	P3/P13	P8
COMB 2	2,24m	2,69m
COMB 8	2,28m	2,62m
FINAL	2,30m	2,70m

FONTE: (Autor, 2016)

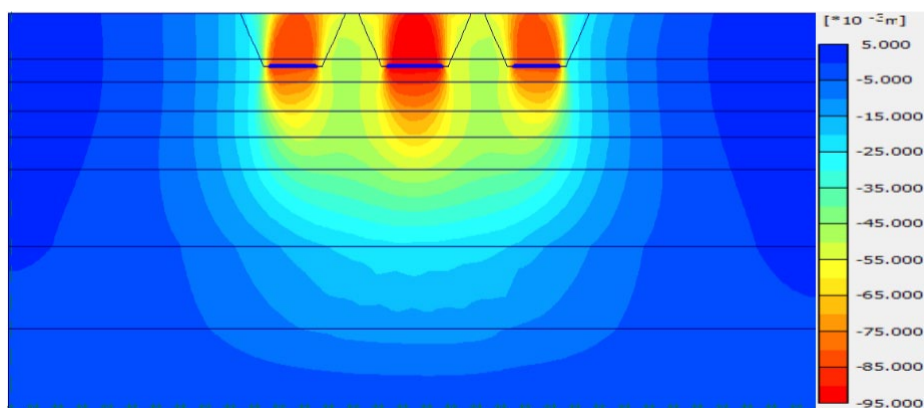
2.3 Análise do comportamento do solo no Plaxis 2D

A partir dos valores das reações obtidos no SAP 2000, considerando apoios engastados, será utilizado o programa Plaxis para analisar o comportamento do solo de acordo com o número de pavimentos do edifício em ordem crescente, e considerando o pórtico assinalado anteriormente. Nesta etapa será utilizada a combinação 12 para efeitos de análise do solo.

Com os parâmetros do solo inseridos no Plaxis juntamente com as propriedades das sapatas é feita a modelagem das fundações do pórtico para se obter um resultado mais detalhado, o refinamento do programa foi feito três vezes e o nível d'água foi considerado a partir dos 6,85 metros, referente ao perfil de sondagem utilizado.

Os deslocamentos verticais podem ser vistos na figura 2.

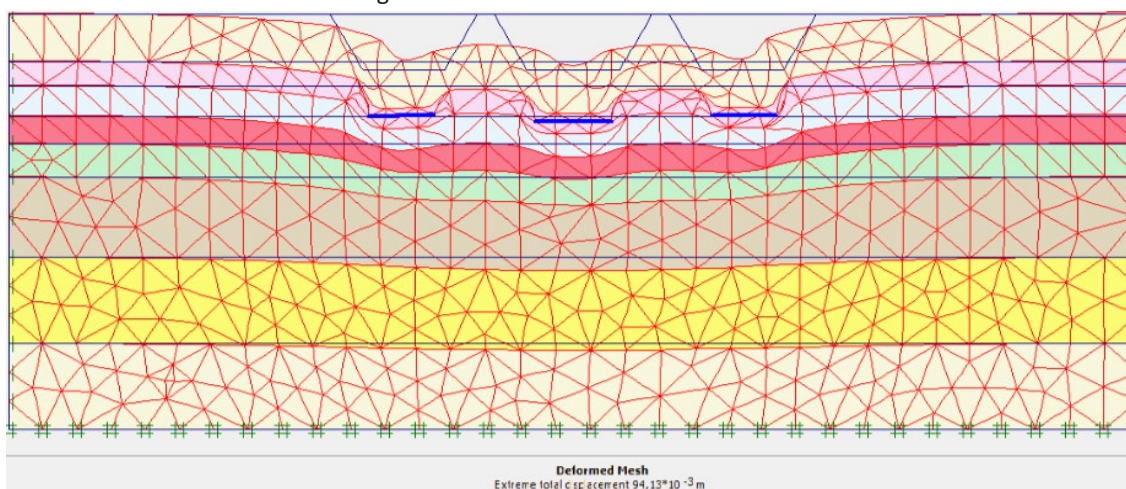
Figura 2 - Deslocamentos verticais no Plaxis2D



FONTE: (Plaxis, 2012)

Onde foi verificado um deslocamento maior nos pontos imediatamente abaixo da sapata (Figura 3).

Figura 3 - Malha deformada no Plaxis2D



FONTE: (Plaxis, 2012)

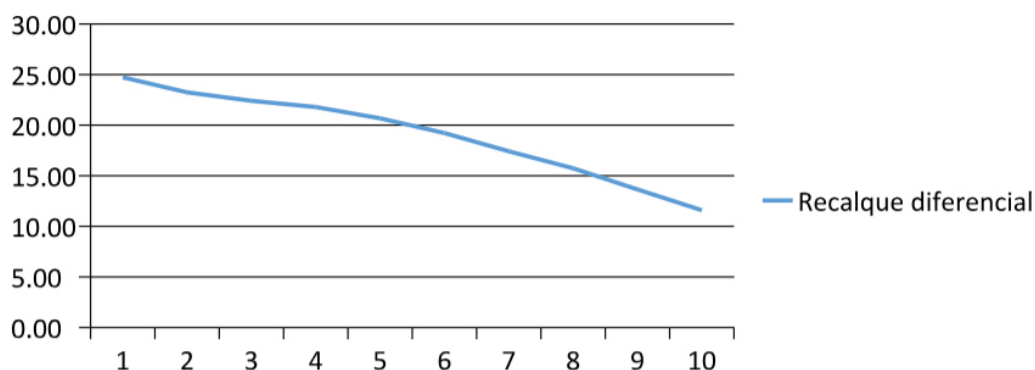
Com os resultados dos deslocamentos verticais ilustrados na figura 3, foi possível verificar a evolução do recalque de acordo com o número de pavimentos para os pilares do pórtico (Tabela 5 e Figura 4).

Tabela 5 - Recalque diferencial

Nº DE PAV	P8	P3/P13	DIFERENÇA (%)
1	1,86	1,4	24,73
2	2,71	2,08	23,25
3	3,57	2,77	22,41
4	4,45	3,48	21,80
5	5,32	4,22	20,68
6	6,19	5	19,22
7	7,06	5,83	17,42
8	7,94	6,69	15,74
9	8,79	7,59	13,65
10	9,4	8,31	11,60

FONTE: (Autor, 2016)

Figura 4 - Recalque diferencial



FONTE: (Autor, 2016)

Analisando as diferenças entre os pilares do solo, é possível perceber que estas diminuem a medida que o número de pavimentos aumenta, confirmando os estudos feitos por Meyerhof (1953), sobre o aumento da rigidez relativa de acordo com o número de pavimentos. Devido a esta afirmação, ocorre a diminuição dos recalques diferenciais.

2.4 Deslocamentos verticais pelos métodos analíticos

Neste tópico serão determinados os deslocamentos verticais no centro da camada de argila do perfil do solo através de métodos de cálculo fornecidos na literatura

Para as primeiras camadas de areia será utilizado o método proposto por Schmertmann & Asce (1970). Para a camada de argila será utilizada a solução proposta por Streibrenner para a determinação da tensão no centro da camada.

2.4.1 Cálculo do recalque devido a camada de areia

Resumidamente o valor encontrado pelo cálculo de Schmertmann é:

$$\rho_1 = 0,97 \cdot 1,54 \cdot 559 \cdot \sum \left(\frac{0,0241}{10^3} \right) = 0,0201m = 2,01cm$$

2.4.2 Cálculo do recalque devido camada de argila

Para os parâmetros adotados o recalque da camada de argila calculado pelo método proposto por Streibrenner é:

$$\rho_2 = 205 / (1+3) \times 0,20 \times \log 178,41/81,22 = 3,50cm$$

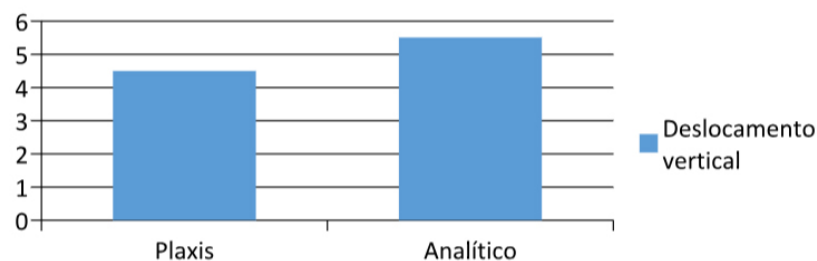
Gerando um recalque total de:

$$P_{total} = P_1 + P_2 = 2,01 + 3,50 = 5,51cm$$

2.5 Comparações entre o Plaxis e o método analítico

Ao verificarmos no Plaxis o valor do recalque a 4,74m de profundidade levando em consideração o fundo sapata do pilar P8, encontra-se 4,5cm de recalque, e no método analítico foi encontrado 5,51cm (Figura 5).

Figura 5 - Deslocamento vertical Plaxis x Deslocamento vertical analítico



FONTE: (Autor, 2016)

Sendo assim, a diferença entre eles é menor que 13%. Com ordem de grandeza equivalente, a diferença pode ser considerada irrelevante devido à dimensão do trabalho.

2.6 Análise do edifício com apoios com molas no SAP2000

A partir do método proposto por Winkler (1867), podemos supor no programa SAP2000 que os apoios estão sobre molas considerando o modelo do solo como o meio contínuo. Depois de calcular os coeficientes de mola para cada sapata, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de Kmv

Sapatas	Área (m ²)	Kv (kN/m ³)	Kmv (kN/m)
S3 e S13	4,15	6222,58	25823,71
S8	5,72	6393,76	36572,31

FONTE: (Autor, 2016)

Ao colocarmos estes valores de Kmv no SAP 2000 teremos novas reações de apoio.

2.7 Comparação entre o modelo com apoios indeslocáveis e o modelo com molas

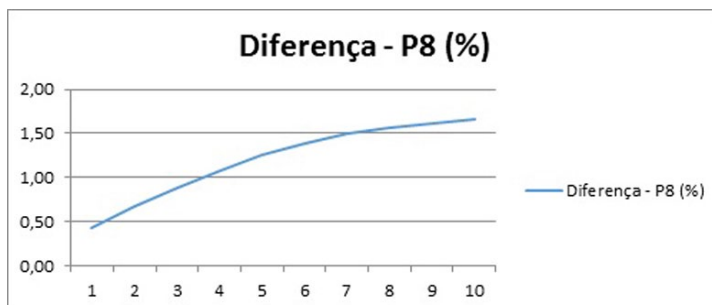
Usando a combinação 12 para a comparação dos modelos com ISE e sem ISE, por ser a mesma utilizada no Plaxis, pode-se perceber algumas alterações ao considerarmos a ISE nas reações do pórtico analisado, de acordo com o número de pavimentos do edifício (Tabela 7 e Figura 6).

Tabela 7 - Combinação 12 – Pilar 8

Nº DE PAV	S/ ISE (kN)	C/ ISE	DIFERENÇA (%)
1	659,90	657,04	0,43
2	989,72	983,102	0,67
3	1316,75	1305,048	0,89
4	1640,26	1622,482	1,08
5	1959,56	1935,052	1,25
6	2274,11	2242,545	1,39
7	2583,50	2544,884	1,49
8	2887,44	2842,102	1,57
9	3185,80	3134,294	1,62
10	3401,24	3344,902	1,66

FONTE: (Autor, 2016)

Figura 6 - Diferença – Pilar 8



FONTE: (Autor, 2016)

Foi possível perceber um alívio do pilar central e percebe-se também que a diferença entre as reações aumenta de acordo com o número de pavimentos do edifício.

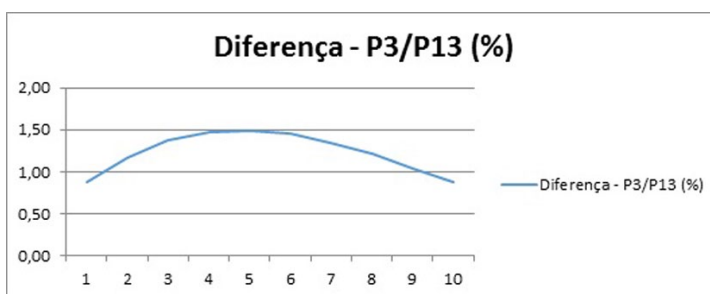
Na Tabela 8 podemos perceber que diferente dos pilares centrais, os pilares de periferia sofreram um acréscimo de carga com a consideração da ISE. Porém, esta diferença aumenta até o quinto pavimento e após este, converge até a diferença inicial (Figura 7).

Tabela 8 - Combinação 12 – Pilares 3 e 13

Nº DE PAV	S/ ISE (kN)	C/ ISE	DIFERENÇA (%)
1	392,85	396,334	-0,89
2	597,77	604,864	-1,19
3	807,35	818,606	-1,39
4	1022,66	1037,956	-1,50
5	1243,57	1262,41	-1,51
6	1471,55	1493,168	-1,47
7	1706,65	1730,001	-1,37
8	1949,87	1973,845	-1,23
9	2199,67	2222,867	-1,05
10	2401,59	2422,874	-0,89

FONTE: (Autor, 2016)

Figura 7 - Diferença – Pilar P3/P13



FONTE: (Autor, 2016)

2.8 Coeficiente de mola encontrado através dos resultados do Plaxis

Com os resultados dos deslocamentos verticais obtidos no Plaxis, de acordo com o número de pavimento do edifício, foi possível determinar um coeficiente de reação vertical K_v e consequentemente, um coeficiente de mola (K_{mv}) para ser utilizado no SAP2000.

Sendo assim, foram obtidos valores de recalque para os dois programas utilizados, conforme mostra a tabela 9.

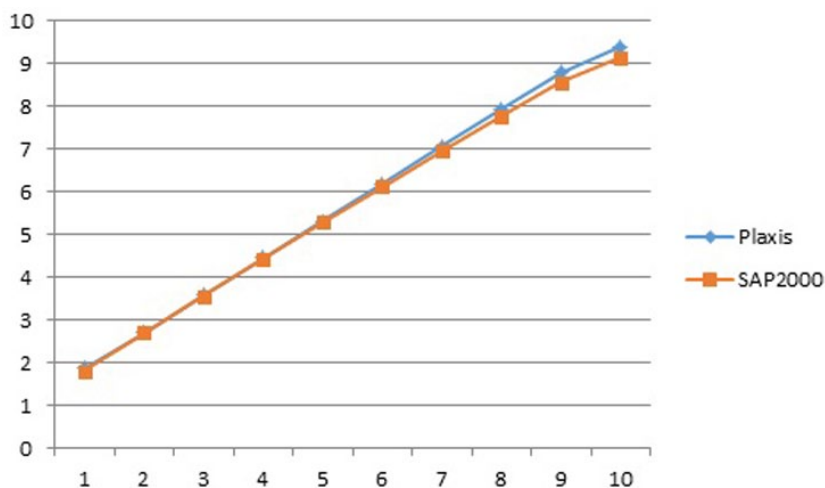
Tabela 9 - Deslocamentos verticais Plaxis X Deslocamentos verticais SAP2000

Nº DE PAV	PLAXIS (cm)	SAP2000(cm)	DIFERENÇA (%)
1	1,86	1,8	3,23
2	2,71	2,7	0,37
3	3,57	3,56	0,28
4	4,45	4,43	0,45
5	5,32	5,29	0,56
6	6,19	6,13	0,97
7	7,06	6,96	1,42
8	7,94	7,77	2,14
9	8,79	8,57	2,50
10	9,4	9,15	2,66

FONTE: (Autor, 2016)

Foi possível perceber que a diferença entre os dois resultados foi pequena considerando que foi comparado um programa geotécnico com um programa estrutural (Figura 8).

Figura 8 - Deslocamentos verticais Plaxis X Deslocamentos verticais SAP2000



FONTE: (Autor, 2016)

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido demonstrou a relação da interação solo-estrutura em um programa estrutural e um programa geotécnico. Realizando uma comparação no SAP2000 entre um edifício com bases engastadas e outro com bases com molas, foi possível ver que houve uma redistribuição de tensões, onde as reações verticais nos pilares centrais sofreram um alívio de carga, enquanto os pilares da periferia sofreram acréscimos. Além disso, foi possível perceber que as diferenças entre as reações aumentam com o número de pavimentos para os pilares centrais, já no caso dos pilares periféricos, esta diferença aumenta até o quinto pavimento, a partir do qual passa a diminuir até a diferença inicial.

Ao verificarmos o comportamento do solo no Plaxis, foi possível ver que de acordo com o número de pavimentos, o recalque diferencial diminui gradativamente conforme foi visto na literatura, comparando – se os pilares da periferia com o pilar central.

Na comparação dos resultados para os deslocamentos verticais entre o Plaxis e o método analítico, percebe -se que os valores tiveram a mesma ordem de grandeza e os foram bem próximos, com uma diferença de aproximadamente 13%, o que é consideravelmente pequeno devido à dimensão dos cálculos. Sendo assim podemos considerar o modelo do Plaxis validado pelo método analítico.

Na comparação realizada entre os deslocamentos verticais do Plaxis e do SAP2000, foi possível analisar que os resultados em função do número de pavimentos foram bem próximos, apesar de se comparar um programa geotécnico com um programa estrutural.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (Errata em 2000). Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BOWLES, J.E. **Foundation Analysis and Design**. 4th Ed., McGraw-Hill Bookco, New York, N.Y., 1988.

DANZIGER, F. A. B.; DANZIGER, B. R; CRISPEL, F. A. **A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações**. In: IV SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA. São Paulo, v.1, p.191202, 2005.

DE BEER, E.E. **Proefondervindelijke bijdrage tot de studie van het gransdraagvermogen van zand onder funderingen op staal**. Annales des Travaux Publics de Belgique, Belgique, 68, nº6, pp. 481-506; 1967.

MEYERHOF, G.G. **Some recente foundation research and its application to design.** Structural Engineering. Londres, 1953.

PLAXIS, Plaxis Bv, Inc., P.O. Box 572, 2600 An Delft, The Netherlands, Version 12.0, **Plaxis Finite Element Code for Soil an Rock Analyses:** Reference Manual, 2nd Edition, 2012.

SAP 2000. **Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structure. Structural Analysis Program,** Advanced 10.01, Computer and Structures, Inc; 2005.

SCHMERTMANN, J. H., ASCE, M., 1970, **Static cone to compute static settlement over sand,** Journal of Soil Mechanics and Foundations Division,v. 96, n. SM3, pp. 1011-10143.

TERZAGHI, K. **Evaluation of coefficient of subgrade reaction.**Geotechnique, London, v. 5, n. 4, p. 297-326, 1955.

VÉSIC, A.S. Principles of pile foundation design. Duke University, School of Engineering, Soil Mechanics Series nº 38, 1975.

WINKLER, E. **Die Lehre von der Elastizitat und Festigkeit.** Domicius, Prag, 1867.